مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۱-۳۸، شماره‌ی ۲، ص. ۲۹-۳۸، (پژوهشی)

Original Article

برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارهای مترو با هدف بیشینه‌سازی قابلیت دسترسی قطارها (مطالعه‌ی موردی: خط ۲ متروی تهران)

محسن محرابی (کارشناس ارشد)
محسن پورسید آقایی * (استادیار)
دانشکده‌ی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری قطارها در مترو به دلیل در دسترس بودن بیشتر قطارها، کاهش زمان تأخیر قطارها و رضایت مردم از سیستم حمل‌ونقل ریلی از اهمیت ویژه‌یی برخوردار است. هدف این پژوهش بیشینه‌سازی قابلیت دسترسی قطارهاست. همچنین برای روش پژوهش، از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارهای خط دو مترو تهران استفاده شده است. محدودیت‌های عملیاتی مدل شامل طول زمان انجام فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری، چرخه‌های زمانی فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری، ظرفیت تیم‌های خدمه‌ی تعمیرات و نگهداری و حداقل تعداد قطارهای در دسترس در خط است. مدل شامل دو تابع هدف است؛ تابع هدف اول سعی می‌کند تعداد فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری را بیشینه کند و تابع هدف دوم سعی می‌کند روزانه تعداد قطار کم‌تری به واحد تعمیرات و نگهداری فرستاده شود. در ادامه برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارهای خط دو مترو تهران از الگوریتم ابتکاری عقب‌گرد استفاده شده است. طبق نتایج ارائه شده می‌توان بهبود ۲۱٫۴۲ درصدی در خط ۲ مترو تهران ارائه کرد؛ به عبارت دیگر قابلیت دسترسی قطارها را ۲۱٫۴۲ درصد افزایش داد.

واژگان کلیدی: زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری، تعمیرات و نگهداری قطارها، زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارهای مترو، مدل ریاضی بهینه‌سازی.

mohsen_mehrabi@rail.iust.ac.ir
maghaee@iust.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از مواردی که به حل بحران ترافیک در شهرهای بزرگ کمک می‌کند، استفاده از وسایل حمل و نقل عمومی است. حمل و نقل عمومی همچنین تأثیر به‌سزایی در کاهش ترافیک شهرها دارد. یکی از محبوب‌ترین روش‌های حمل و نقل عمومی در جهان مترو است. مترو در مقایسه با اتومبیل‌های شخصی و سایر روش‌های حمل و نقل عمومی برای حمل و نقل مسافران دارای مزایایی همچون ایمنی بالاتر، راحتی بیشتر مسافران، سازگاری بیشتر با محیط زیست، سرعت بالاتر و قیمت پایین‌تر است. به همین دلیل تعداد مسافران بسیار زیادی با استفاده از آن جابه‌جا می‌شوند؛ و لذا افزایش عملکرد مترو برای دولت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین به منظور دست‌یابی به عملکرد بالاتر و بهتر در سیستم مترو، باید قابلیت دسترسی قطارها را افزایش داده و تأخیر در زمان‌های رفت و آمد قطارها را کاهش دهیم. یکی از روش‌های قابل ملاحظه برای افزایش قابلیت دسترسی قطارها افزایش تعداد ناوگان است. لازم به ذکر است که افزایش تعداد ناوگان برای دولت‌ها بسیار هزینه‌بر خواهد بود. لذا با نگاه دقیق‌تر به روش‌های کاهش هزینه‌های متحمل شده، می‌توان فهمید که برنامه‌ریزی مناسب زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری به طور چشمگیری از هزینه‌های تملک ناوگان جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، برنامه‌ریزی صحیح عملیاتی سرویس قطارها منجر به توقف کم‌تر و در دسترس بودن هرچه بیشتر قطارها می‌شود. افزون بر این، حجم بالای سرمایه‌گذاری و عمر طولانیِ دارایی‌های فیزیکی اهمیت تعمیرات و نگهداری را افزایش می‌دهد، زیرا استفاده از یک برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری مناسب عملکرد قطارها را افزایش می‌دهد و از هزینه‌های اضافی بهره‌برداری جلوگیری می‌کند. با گذشت سال‌ها، عدم وجود برنامه‌ریزی مناسب برای زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری در خط دو مترو تهران به شدت احساس می‌شود. خط دو مترو تهران برای یک سرفاصله‌ی دودقیقه‌یی طراحی شده است اما در عمل، زمان واقعی سرفاصله تقریباً دو برابر بیشتر از زمانِ طراحی شده است. بنابراین، این میزان اختلاف باعث می‌شود که مترو نتواند طبق برنامه‌ها به درستی پاسخگوی تقاضای جابه‌جایی مسافران باشد. سعی ما بر آن است که قابلیت دسترسی قطارها

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۲/۱۴، پذیرش ۱۴۰۱/۱/۳۰.
DOI:10.24200/J65.2022.57195.2185

را بیشینه کنیم، چراکه با این کار عملاً زمان سرفاصله‌ی قطارها را کاهش می‌دهیم. بنابراین با ارائه‌ی یک برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری مناسب، نه تنها می‌توانیم قابلیت دسترسی قطارها را افزایش دهیم، بلکه احتمال اختلال در سیستم را نیز کاهش می‌دهیم. افزایش پایداری دارایی‌ها و بهره‌وری امکانات، نیازمند انواع مختلفی از تعمیرات و نگهداری است که سازمان‌ها بر اساس بودجه، میزان منابع، سطح تجربه و اهداف تعمیرات و نگهداری، از یک یا چند نوع تعمیرات و نگهداری استفاده می‌کنند. به‌عنوان مثال تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه، تعمیرات و نگهداری اصلاحی، تعمیرات و نگهداری قابل‌پیش‌بینی و غیره. از آن‌جا که روش تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه به طور قابل توجهی به تشخیص قبل از بحران و اشتباهات عملکرد شبکه کمک می‌کند، بسیاری از سازمان‌ها تمایل دارند از این روش استفاده کنند. بنابراین سعی داریم در این مطالعه از یک روش تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه استفاده کنیم. تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه مجموعه وظایفی است که برای بررسی وضعیت موجود، به روزرسانی و نگهداری تجهیزات در شرایط نامطلوب انجام می‌شود، روشی که باعث افزایش طول عمر دارایی و افزایش بهره‌وری و کاهش استهلاک تجهیزات می‌شود. بنابراین، هزینه‌های سنگین خرید و تعمیر قطعات مجموعه را کمینه می‌کند.[۱] با توجه به این که، فعالیت تعمیرات و نگهداری هر قطار باید بر اساس چرخه‌ی زمانی مناسب یا مسافت پیموده شده باشد،[۲] خط دو مترو تهران هنوز برنامه‌ریزی زمان‌بندی کارآمدی برای تعمیرات و نگهداری قطارها ارائه نکرده است و عمدتاً تعمیرات و نگهداری قطارها بر اساس روش‌های قبلی انجام می‌شود؛ با این وجود به سختی انتظار می‌رود که نتایج مطلوبی حاصل شود. در طی سال‌ها مدل‌های بهینه‌سازی تعمیرات و نگهداری متعددی منتشر شده است که اکثر آنها روی یک معیار یا هدف بهینه‌سازی تمرکز می‌کنند.[۳] بنابراین، برای تهیه‌ی یک برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری مناسب برای خط دو مترو تهران، ما به اجزا و سیستم‌هایی نیاز داریم که ورودی‌های بسیار مهمی هستند و اطلاعات اساسی درباره تصمیم‌گیری درمورد زمان انجام تعمیرات و نگهداری یا بازرسی را ارائه می‌دهند. در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه ارائه شده است. در این مدل، برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارهای مترو با هدف تعیین فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری در هر روز، زمان و تیم خدمه‌ی هر قطار انجام شده است، در همین حال مجموع تعداد فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری و قابلیت دسترسی قطارها بیشینه می‌شود. سرانجام، نتایج محاسباتی برای برخی از سناریوها بر اساس داده‌های به دست آمده از خط دو مترو تهران برای اعتبارسنجی مدل و نشان دادن عملکرد آن ارائه شده است. در ادامه این مقاله، در بخش دوم خلاصه‌یی از ادبیات مربوط به برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری شرح داده شده است. در بخش سوم، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه را ارائه می‌دهیم. نتایج محاسباتی مدل، با استفاده از یک مثال ساده در بخش چهارم ارائه شده است. در بخش پنجم، برخی از سناریوها را برای نشان دادن تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل ارائه می‌کنیم و در نهایت نتیجه‌گیری را در بخش ششم ارائه می‌کنیم.

۲. مروری بر مطالعات گذشته

طی سال‌های متمادی در ارتباط با زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری ناوگان ریلی، مطالعات متعددی انجام شده است. بر اساس این مطالعات، به منظور حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری ناوگان ریلی به طورکلی دو رویکرد اساسی مبتنی بر روش‌های شبیه‌سازی و تکنیک‌های تحقیق در عملیات اتخاذ شده است. خلاصه‌یی از مطالعات اخیر را در این بخش ارائه می‌دهیم. چان و همکاران[۴] در سال ۱۹۹۸ برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری در یک سازمان خدماتی که برای حمل و نقل عمومی از سیستم راه‌آهن زیرزمینی بهره می‌گیرد، از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. هدف آنها رفع نیازهای تعمیرات و نگهداری واحدهای مختلف ناوگان ریلی در زمان مربوطه و معین بود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک بسیار مؤثر است و می‌تواند به طور مرتب راه‌حل‌های بهینه را برای این مسئله ارائه دهد. همچنین آنها در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ بین عملکرد الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی‌های زمان‌بندی دستی که توسط شرکت حمل و نقل عمومی هنگ‌کنگ ایجاد شده مقایسه‌ی خوبی ارائه دادند. برای هر دو سال، بهبود کلی هزینه‌ها حدود ۲۵ درصد بوده است. سواکس و کوئری[۵] در سال ۲۰۰۳ اقدام به حل یک مسئله‌ی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری مبتنی بر رویکرد استوار در یک شرکت راه‌آهن فرانسوی کردند. یک هدف کلی این شرکت کاهش توقف‌های بیش از حد قطارها در طول تعمیرات و نگهداری است. در این مطالعه ظرفیت واحد تعمیرات و نگهداری، فقط یک قطار است. از این رو هدف این مطالعه ارائه‌ی مدلی برای کمینه کردن زمان کل تعمیرات و نگهداری یک قطار است. یکی از مشکلات مهمی که وجود دارد این است که گاهی ممکن است یک عملیات بیشتر از زمان برنامه‌ریزی شده به طول انجامد، بنابراین هدف ارائه‌ی یک مدل ربات است زیرا الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رویکرد استوار راه‌حل‌هایی با همان کیفیت و چه بسا بهتر از الگوریتم ژنتیک ارائه می‌دهد. در سال ۲۰۰۶ هانی و همکاران[۶] برای ارزیابی عملکرد مرکز تعمیرات و نگهداری قطارها یک مدل شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ارنا توسعه دادند. امروزه بسیاری از شرکت‌های تولیدی سیستم‌های تولید خود را به گونه‌یی رقابتی‌تر تغییر می‌دهند. با توجه به هزینه‌های بالای سازماندهی فیزیکی و به منظور تضمین کارآیی آن، تولیدکنندگان علاقه‌مند به تکنیک‌های مربوط به مدل‌سازی و شبیه‌سازی هستند. روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی عملکرد با آزمودن سیاست‌های مختلف زمان‌بندی استفاده شد. همچنین ابزار بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک است. بنابراین، آنها یک مسئله‌ی چندهدفه را مورد بررسی قرار دادند که نتایج حاصل از آن نشان‌گر بهبودی قابل ملاحظه بود. دوگنی و بهلین[۷] در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای بهینه‌سازی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطعات یدکی که باید در انبار تعمیرات و نگهداری، ذخیره شوند ارائه دادند. ارزیابی آنها نشان داد که برای هر سناریو، هزینه‌های قطعات یدکی، هزینه‌های کلی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. به این ترتیب، به جای کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری تنها یک قطار، می‌توانیم برای همه‌ی قطارها بهینه‌سازی را انجام بدهیم و در عین حال، محدودیت‌های ناوگان را نیز برآورده کنیم. مدل آنها زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه را به‌عنوان یک مسئله‌ی قطعی مورد توجه قرار می‌داد. پارک و یون و همکاران[۸] در سال ۲۰۱۱ به بررسی مسئله‌ی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه برای یک سیستم ناوگان ریلی پرداختند. آنها برای بهینه‌سازی فاصله‌های تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه‌ی سیستم ناوگان ریلی و زیرسیستم‌ها هزینه‌های چرخه‌ی زندگی و قابلیت دسترسی به سیستم را در نظر گرفتند. آنها تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه‌ی کوتاه‌مدت و بلندمدت را در نظر گرفتند و با استفاده از تابع بهینه‌سازی فاصله با استفاده از ماژول قابلیت شبیه‌سازی با نمونه‌های عددی، فواصل تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه‌ی کارآمد سیستم و زیرسیستم‌های ناوگان ریلی را پیدا کردند. هان و همکاران[۹] در سال ۲۰۱۳، در مطالعه‌شان زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه مسائل مربوط به ناوگان ریلی، به ویژه قطارکره‌یی سریع‌السیر را عنوان کردند و می‌خواستند فواصل

بهینه‌ی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه در اجزای سیستم را تعیین کنند. آنها قابلیت دسترسی سیستم و هزینه‌ی چرخه‌ی عمر را به‌عنوان معیارهای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار دادند و توسط شبیه‌سازی تخمین زدند. همچنین به منظور ساخت مدل شبیه‌سازی، سناریوی عملیاتی و سطح تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه قطار کره‌یی سریع‌السیر را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها یک روش ابتکاری و الگوریتم ژنتیک را نیز برای یافتن فواصل بهینه‌ی نزدیک به تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه برای تمام اجزای سازنده‌ی ناوگان ریلی در نظر گرفتند. در مثال‌های عددی، آنها دو مورد خاص و دو روش انتساب را در نظر گرفتند و فواصل تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه مناسب را به تمام اجزا اختصاص دادند تا هزینه‌های چرخه‌ی عمر سیستم را کمینه کنند و در همه موارد به قابلیت دسترسی مورد نیاز سیستم برسند. نتایج عددی نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک از روش ابتکاری بهتر است. با این حال، محدودیت‌های منابع تعمیرات و نگهداری مانند مهندسان، تجهیزات تعمیرات و نگهداری و قطعات یدکی در محل تعمیرات و نگهداری وجود دارد. بنابراین فواصل زمانی بهینه‌ی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه برای سیستم‌های چندگانه تعیین می‌شود. ژنگ و هو[۱۰] در سال ۲۰۱۴ به مسئله‌ی تعمیرات و نگهداری چندمنظوره‌ی ناوگان ریلی مترو پرداختند. آنها یک مدل تعمیرات و نگهداری را با استفاده از سیستم کاهش سن در نظر گرفتند که بهبود پس از تعمیرات و نگهداری را بیان می‌کند؛ همچنین یک رابطه بین سطح تعمیرات و نگهداری با هزینه پیشنهاد شده است. تابع تولید جهانی را برای تسهیل ارزیابی احتمال موفقیت مأموریت‌های بعدی مورد استفاده قرار دادند. همچنین آنها ضریب کاهش سن را نیز محاسبه و ارائه کرده‌اند. با این وجود، از محدودیت‌های این کار می‌توان به این نکته اشاره کرد که هر المانی به‌صورت باینری فرض می‌شود و قابلیت اطمینان و سن هر المان را نیز می‌توان به دست آورد. سبک و سنگین کردن بین میزان موفقیت و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و همچنین سایر منابع تعمیرات و نگهداری محدود (مانند تعمیرگاه، قطعات یدکی، زمان تعمیرات و نگهداری) نیاز به بهینه‌سازی چندهدفه دارد. در سال ۲۰۱۴ کاریلو و همکاران[۱۱] چارچوب جدیدی برای مسائل مربوط به زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری ناوگان‌های ریلی توصیف کردند. آنها یک فرمول جدید برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای مسائل زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری با داده‌های گرفته شده از طرح برنامه‌ریزی ترتیبی ناوگان ریلی برای مدیران شرکت‌های قطار ترنیتالیا ارائه داده‌اند. یعنی یافتن زمان‌بندی‌های امکان‌پذیر با کمترین تعداد جابه‌جایی در کارگاه، همچنین یک حل‌کننده‌ی تجاری در عرض چند دقیقه قادر به حل نمونه‌های عملی در این مسئله است، بنابراین فرمول پیشنهاد شده را می‌توان برای محاسبه راه حل‌هایی با کیفیت خوب و در زمان واقعی نیز تصویب کرد. دی آریانو و همکاران[۱۲] در سال ۲۰۱۴ روشی جدید برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری کوتاه‌مدت و برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری ناوگان ریلی ارائه دادند. مسئله‌ی ریاضی این است که یک چرخه‌ی همیلتونی کمترین هزینه در یک گراف با جفت سرویس، راندن خالی و وظایف تعمیرات و نگهداری پیدا کنیم. آزمایش‌های محاسباتی روی یک حل‌کننده‌ی تجاری برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط انجام می‌شود و ارزیابی کاملی از جدول زمانی و لیست‌ها را نشان می‌دهد. رویکرد پیشنهادی در کاهش هزینه‌های شرکت در مقایسه با راه حل‌های عملی، با و بدون در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری عملیات راه‌آهن، بسیار مؤثر است. آنها به ویژه سعی کردند به این سوال پاسخ دهند که «آیا می‌توان راه حل‌های عملی را اول از نظر تعداد قطارهای مورد نیاز برای پوشش همه‌ی خدمات و سپس از نظر تعداد راندن‌های خالی و بهره‌وری تعمیرات و نگهداری بهبود داد؟» در واقع، این کار با بهبود یکی از این شاخص‌های عملکرد به دست می‌آید. هوانگ و همکاران[۱۳] در سال ۲۰۱۵ یک مدل بهینه‌سازی دقیق برای بهبود بهره‌وری در استفاده از ناوگان ریلی با در نظر گرفتن تمام مقررات لازم و محدودیت‌های عملی ارائه کردند. در مقایسه با فرایند دستی یک فرایند ترکیبی ابتکاری نیز برای بهبود کیفیت و کارایی در راه حل، توسعه یافته است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که فرایند ابتکاری می‌تواند بهره‌وری ناوگان‌های ریلی را تا حدود ۵ درصد افزایش دهد. با استفاده از این ابزار، پشتیبانی می‌تواند به منظور بهبود بهره‌وری در استفاده از ناوگان ریلی و بهره‌وری در فرایند تخصیص ناوگان ریلی به راه‌آهن کمک کند. فوری و همکاران[۱۴] در سال ۲۰۱۵ یک مدل مناسب برای تعمیرات و نگهداری ناوگان ریلی را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که یک ناوگان ریلی یک سیستم چندجزئی است و هر جزء برای ویژگی‌های قابلیت اطمینان باید تجزیه و تحلیل شود. این فرایند به تصمیم‌گیری درمورد یک مدل مناسب از قبیل قانون توان فرایند پواسون غیرهمجنس یا لگاریتم خطی نسبت به توزیع وایبول برای سیستم‌های قابل تعمیر کمک می‌کند. مثال عددی با استفاده از برخی اجزاء ناوگان ریلی ارائه شد؛ نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل اجزاء نشان می‌دهد که اجزاء یک مدل، فرایند پواسون غیرهمجنس را دنبال می‌کنند و بنابراین با استفاده از نظریه‌ی بازسازی فرایند پواسون غیرهمجنس مدل‌سازی می‌شوند. آندرس و همکاران[۱۵] در سال ۲۰۱۵ یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط برای مسئله‌ی مسیریابی تعمیرات و نگهداری ارائه دادند. آنها دو نوع محدودیت تعمیرات و نگهداری را در نظر گرفتند: محدودیت‌های موقعیت و طول انجام، محدودیت‌های تعمیرات و نگهداری که ممکن است برای حل افق‌های برنامه‌ریزی مختلف سازگار باشد. مدل آنها برای تعمیرات و نگهداری در افق روزها یا هفته‌ها اقتباس شده است، اما با تغییرات کوچک، فرمولاسیون می‌تواند برای مطالعه نیازهای تعمیرات و نگهداری بزرگتر، سازگار باشد. این مدل ظرفیت انبار تعمیرات و نگهداری و دیگر ملاحظات تعمیرات و نگهداری را بررسی می‌کند. آنها مسیریابی تعمیرات و نگهداری را با استفاده از روش دانزینگ وولف و شاخه و کران حل کردند. آنها یک مدل را برای قطار و ظرفیت کارگاه تعمیرات و نگهداری در نظر گرفتند. ونگ و همکاران[۱۶] در سال ۲۰۱۶ بر اساس وضعیت عملیاتی ایستگاه قطار پکن در جنوب چین، در بخش مراقبت ویژه بر مجموعه‌ی به حرکت آورنده‌های قطار تمرکز کردند و روش بهینه‌سازی برای تخصیص و زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری مجموعه‌ی به حرکت آورنده‌های قطار را بررسی کردند. پس از تجزیه و تحلیل اهداف و محدودیت‌های بهینه‌سازی، رابطه‌یی بین متغیرهای درونی متناظر تعریف کردند، و سپس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح صفر و ۱ را برای تخصیص و زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری مجموعه به حرکت آورنده‌های قطار ارائه دادند. ژنگ و همکاران[۱۷] در سال ۲۰۱۶ یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی دوسطحی چندهدفه‌ی عدد صحیح مختلط را برای زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری ناوگان ریلی ارائه کردند. سپس یک الگوریتم عقب‌گرد را با دو نوع ابتکار مرتب‌سازی و تکنیک گسترش محدودیت طراحی کردند تا مدل را به‌صورت کاراتر حل کند. این مطالعه می‌تواند کارایی تعمیرات و نگهداری ناوگان ریلی را بهبود ببخشد و می‌تواند ایمنی عملیات قطار را در خط اصلی حفظ کند. در مدل، سیستم‌های تعمیرات و نگهداری، جدول زمانی عملیات قطار در خط اصلی و ظرفیت تیم تعمیر نگهداری خدمه در نظر گرفته شده است. وارنیر و همکاران[۱۸] در سال ۲۰۱۷ بهینه‌سازی مشترک تخصیص و زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارها را در زمینه‌ی پیشگیری و مدیریت سلامت پیشنهاد دادند. دانش پیشگیری برای راه‌اندازی فعالیت تعمیرات و نگهداری تنها زمانی مورد نیاز است که سطوح تخریب به آستانه‌ی ثابت رسیده باشد. آنها یک فرمول ریاضی با جزئیات دقیق ارائه دادند که شامل یک تابع هدف برای کمینه‌سازی سطح تخریب قبل از هر فعالیت تعمیرات و نگهداری است و محدودیت‌های مختلفی در زمینه‌ی راه‌آهن دارد. لین و همکاران[۱۹] در سال ۲۰۱۷ مسئله‌ی برنامه‌ریزی

تعمیرات و نگهداری را برای قطارهای برقی در زمینه مدیریت راه‌آهن سریع‌السیر ارائه و یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی صفر و ۱ برای این مسئله پیشنهاد کردند. هدف مدل کمینه‌سازی هزینه‌های کل ناشی از عدم استفاده‌ی مناسب و کافی از مسافت باقیمانده است. آنها دوره‌های زمانی مختلفی طی یک سال داشتند که نیازمند تعمیرات و نگهداری با نرخ متفاوت بود. برای توصیف این که قطارهای برقی تحت تعمیرات و نگهداری هستند، یک تابع حالت طراحی کردند. با کمک این تابع، محدودیت‌های تعمیرات و نگهداری را می‌توان به‌سادگی فرموله کرد. آنها برای حل مسئله روی یک الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به جای الگوریتم‌های دقیق تمرکز کردند. ونگ و همکاران[۲۰] در سال ۲۰۱۸ به بررسی مسئله‌ی برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری قطار برقی پرداختند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح صفر و ۱ و یک الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات اصلاح شده پیشنهاد دادند. تابع هدف این مدل کمینه‌سازی مسافت پیموده شده برای تمام قطارهاست، در این مدل مقررات لازم و محدودیت‌های عملی ـ از جمله تقاضای حمل و نقل مسافران، ظرفیت کارگاه تعمیرات و نگهداری و مقررات تعمیرات و نگهداری ـ مد نظر قرار می‌گیرد. یک مثال دنیای واقعی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند راه حل بهینه (تقریبی) را به دست آورد و استراتژی راه‌حل می‌تواند زمان را به طور قابل توجهی تا ۵۰۰ ثانیه کاهش‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با کاهش ۸۴٫۳۱ درصد در زمان حل کارآمدتر از حل‌کننده‌ی بهینه‌سازی تجاری است. مسعود یقینی و همکاران[۲۱] در سال ۱۳۹۷ به فرایند برنامه‌ریزی عملیات تعمیرات و نگهداری خطوط ریلی راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران پرداختند. آنها برای برنامه‌ریزی این عملیات، یک الگوریتم ابتکاری طراحی و ارائه دادند. برای آن که قابلیت الگوریتم بهتر دیده شود، نتایج الگوریتم با برنامه‌ی تهیه شده توسط راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران در سال، مقایسه شده است. برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی یک مدل شبیه‌سازی ارائه شد. در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخص شد که خرابی و تعمیرات ماشین‌آلات، در اجرای برنامه‌ی تهیه شده بسیار مؤثر بوده و اخلال زیادی در آن ایجاد می‌کند. در سال ۱۳۹۷ مؤیدفر و همکاران[۲۲] یک الگوریتم اولویت‌بندی نگهداری و تعمیرات خطوط راه آهن ایران برای بهینه و به‌هنگام سازی برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت عملیات نگهداری و تعمیرات ارائه کردند. آنها شرایط موجود راه‌آهن ایران را بررسی کرده و مطالعات در عرصه‌ی بین‌المللی در راستای ساخت یک الگوریتم اولویت‌بندی را به انجام رسانیدند. در نتیجه مدل‌های لازم برای ارائه‌ی الگوریتم و اولویت‌بندی نگهداری و تعمیرات خطوط بر اساس شاخص هندسه‌ی مسیر با هدف رسیدن به سطح مورد نیاز ایمنی مسیر و راحتی سواری مسافرتی در روش‌های نگهداری و تعمیرات فعلی ارائه شد. مصیب جلیلیان و همکاران[۲۳] در سال ۱۳۹۹ به مدل‌سازی و حل هم‌زمان دو مسئله‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها و زمان‌بندی عملیات نگهداری و تعمیرات خطوط گام برداشتند. با توجه به اهمیت برنامه‌ریزی همزمان مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها و زمان‌بندی عملیات نگهداری و تعمیرات خطوط، آنها ابتدا تحقیقات علمی منتشره درباره‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها را با در نظرگرفتن نگهداری و تعمیرات خطوط بررسی کردند، در نهایت نیز مطالعات صورت گرفته را جمع‌بندی کردند و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه دادند. یوسف شفاهی و همکاران[۲۴] در سال ۱۳۸۲ به معرفی یک مدل ریاضی برای حل هم‌زمان مسئله‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها و تعمیر و نگهداری خطوط با هدف کمینه کردن زمان کل تأخیر قطارها و بهینه کردن زمان مسدودی خطوط برای انجام تعمیر و نگهداری پرداختند. مدل آنها یک مدل برنامه‌ریزی با اعداد صحیح است که به علت بزرگی ابعاد مسئله حل آن در حالت کلی به روش‌های متعارف برای مثال‌های واقعی به راحتی امکان‌پذیر نیست. بنابراین آنها از یک روش ابتکاری برای حل مسئله استفاده کردند.

با توجه به مطالعات گذشته و بررسی مقالات در این زمینه، به طور عمده برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری در راه آهن انجام شده و در سیستم مترو کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مسائل مربوط به بهینه‌سازی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری عمدتاً زیرمجموعه‌یی از شیوه‌های تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه هستند. برای حل این مسائل طبق مطالعات گذشته، بیشتر از روش‌های شبیه‌سازی و روش‌های تحقیق در عملیات استفاده شده است. برای روش‌های حل‌دقیق به طور عمده از برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط و برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شده است. همچنین، برای روش‌های حل تقریبی، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات انتخاب شده است.

۳. تعریف مسئله

برنامه‌ی زمان‌بندی نگهداری مترو شامل مجموعه‌یی از مفروضات و تعاریف است که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت. قطارها در هر خط دارای برنامه عملیات ثابت روزانه برای حمل‌ونقل مسافران هستند. فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری به فعالیت‌های روزانه، هفتگی، ماهانه، سالانه و تعمیرات اساسی تقسیم‌بندی می‌شود. فعالیت‌ها نسبت به یکدیگر اولویت دارند، طول چرخه‌ی زمانی فعالیت‌ها مستقیماً با اولویت آنها مرتبط است؛ برای مثال فعالیت سالانه اولویت بالاتری نسبت به فعالیت ماهانه دارد. برای هر فعالیت تعمیرات و نگهداری، یک تیم خدمه‌ی تعمیرات و نگهداری منحصر به فرد اختصاص داده شده است و ظرفیت روزانه‌ی تیم‌های خدمه‌ی تعمیرات و نگهداری مشخص و بدون تغییر است. هیچ فعالیت تعمیرات و نگهداری را نمی‌توان تا پایان انجام فعالیت قطع کرد. فقط دو پایگاه تعمیرات نگهداری وجود دارد، یکی در ابتدای خط و دیگری در انتها، که تمامی فعالیت‌ها در این دو پایگاه انجام می‌شود.

۱.۳. اندیس‌ها، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها

- **اندیس‌ها**

i: اندیس نشان‌دهنده‌ی قطارها؛

j: اندیس نشان‌دهنده‌ی فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری؛

l: اندیس نشان‌دهنده‌ی تعداد دفعات انجام فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری؛

t: اندیس نشان‌دهنده‌ی دوره‌های زمانی.

- **مجموعه‌ها**

C: مجموعه‌ی قطارها $\{c_1, \ldots, c_i, \ldots, c_{end}\}$؛

R: مجموعه‌ی انواع فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری $\{r_1, \ldots, r_j, \ldots, r_{end}\}$؛

T: مجموعه‌ی افق زمانی برنامه‌ریزی $\{t_1, \ldots, t_k, \ldots, t_{end}\}$.

- **پارامترها**

g_t: کمینه‌ی تعداد قطارهایی که باید در روز $t \in T$ در دسترس باشند؛

a_{jt}: بیشینه‌ی تعداد فعالیت‌ها از نوع $j \in R$ که تیم خدمه در روز $t \in T$ می‌تواند بازدید کند؛

t'_{ij}: زمان پایان آخرین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$ قبل از شروع افق زمانی برنامه‌ریزی شده؛

p_j: اولویت فعالیت تعمیرات و نگهداری نوع $j \in R$؛

$T_j^{\min}$: کوتاه‌ترین دوره زمانی فعالیت تعمیرات و نگهداری نوع $j \in R$؛

$T_j^{\max}$: بلندترین دوره زمانی فعالیت تعمیرات و نگهداری نوع $j \in R$؛

dur_j: طول زمان انجام فعالیت تعمیرات و نگهداری نوع $j \in R$؛

$N_{ij}^{\min}$: کمینه‌ی تعداد دفعات انجام فعالیت تعمیرات و نگهداری نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$ در طول افق زمانی برنامه‌ریزی شده $N_{ij}^{\min} = \frac{t_{end}-t_{ij}^{\circ}-1}{T_j^{\max}+dur_j}$ ؛

T_{ijl}^s: بازه زمانی شروع lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ بر روی قطار $i \in C$؛

$$T_{ijl}^s = [t_{ij}^{\circ} + l \times T_j^{\min} + (l-1) \times dur_j + 1, \\ t_{ij}^{\circ} + l \times T_j^{\max} + (l-1) \times dur_j + 1] \quad (7)$$

T_{ijl}^e: بازه زمانی پایان lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$؛

$$T_{ijl}^e = [t_{ij}^{\circ} + l \times T_j^{\min} + l \times dur_j, \\ t_{ij}^{\circ} + l \times T_j^{\max} + l \times dur_j] \quad (8)$$

T_{ijl}: بازه زمانی شروع و پایان lامین بارانجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$ $T_{ijl} = (T_{ijl}^s \cup T_{ijl}^e)$.

- **متغیرها**

t_{ijl}^s: زمان شروع lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$؛

t_{ijl}^e: زمان پایان lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$؛

x_{ijlt}: متغیر باینری که نشان می‌دهد lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$ در زمان $t \in T_{ijl}^s$ شروع می‌شود؛

y_{ijlt}: متغیر باینری که نشان می‌دهد lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$ در زمان $t \in (T_{ijl}^s \cup T_{ijl}^e)$ رخ می‌دهد.

۲.۳. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه

$$\max \psi_1 = \sum_{i=1}^{c_{end}} \sum_{j=1}^{r_{end}} \sum_{l=1}^{N_{ij}^{\min}} \sum_{t \in T_{ijl}} y_{ijlt}, \quad (1)$$

$$\min \psi_2 = (\max_t \sum_{i=1}^{c_{end}} \sum_{j=1}^{r_{end}} \sum_{l=1}^{N_{ij}^{\min}} y_{ijlt}), \quad (2)$$

$$t_{ijl}^s = \sum_{t \in T_{ijl}} x_{ijlt} \times t, \\ \forall i \in C, j \in R, l \in (1, 2, ..., N_{ij}^{\min}), \quad (3)$$

$$t_{ijl}^e = t_{ijl}^s + dur_j - 1, \\ \forall i \in C, j \in R, l \in (1, 2, ..., N_{ij}^{\min}), \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T_{ijl}} x_{ijlt} \leq 1, \\ \forall i \in C, j \in R, l \in (1, 2, ..., N_{ij}^{\min}), \quad (5)$$

$$x_{ij_1 l_1 t_1} \leq x_{ij_2 l_2 t_2}, \\ \forall i \in C, j_1, j_2 \in R, \\ l_1 \in (1, 2, ..., N_{ij_1}^{\min}), \\ l_2 \in (1, 2, ..., N_{ij_2}^{\min}), \\ t_1 \in T_{ij_1 l_1}^s, t_2 \in T_{ij_2 l_2}^s, \\ if(T_{ij_1 l_1}^s \cap T_{ij_2 l_2}^s) \neq \emptyset, \\ if(j_1 \neq j_2), \\ if(p_{j_1} < p_{j_2}), \\ T_j^{\min} - (1 - x_{ijlt}) \times M \leq t_{ijl}^s - t_{ij}^{\circ} - 1, \\ \forall i \in C, j \in R, l \in (1, 2, ..., N_{ij}^{\min}), \\ t \in T_{ijl}^s, if(l = 1), \\ T_j^{\max} + (1 - x_{ijlt}) \times M \geq t_{ijl}^s - t_{ij}^{\circ} - 1, \\ \forall i \in C, j \in R, l \in (1, 2, ..., N_{ij}^{\min}), \\ t \in T_{ijl}^s, if(l = 1), \\ -(1 - x_{ij(l-1)t_2}) \times M - (1 - x_{ijlt_1}) \\ \times M + T_j^{\min} \leq t_{ijl}^s - t_{ij(l-1)}^e - 1, \\ \forall i \in C, j \in R, l \in (2, 3, ..., N_{ij}^{\min}), \\ t_1 \in T_{ijl}^s, t_2 \in T_{ij(l-1)}^s, \\ (1 - x_{ij(l-1)t_2}) \times M + (1 - x_{ijlt_1}) \\ \times M + T_j^{\max} \geq t_{ijl}^s - t_{ij(l-1)}^e - 1, \\ \forall i \in C, j \in R, l \in (2, 3, ..., N_{ij}^{\min}), \\ t_1 \in T_{ijl}^s, t_2 \in T_{ij(l-1)}^s, \\ T_{j_1}^{\min} - (1 - x_{ij_1 l_1 t}) \times M \leq t_{ij_1 l_1}^s - t_{ij_2 l_2}^e - 1, \\ \forall i \in C, j_1, j_2 \in R, \\ l_1 \in (1, 2, ..., N_{ij_1}^{\min}), \\ l_2 \in (1, 2, ..., N_{ij_2}^{\min}), \\ t \in T_{ij_1 l_1}^s, \\ if(T_{ij_1 l_1}^s \cap T_{ij_2 l_2}^e) \neq \emptyset, \\ if(j_1 \neq j_2), \\ if(p_{j_1} < p_{j_2}), \\ T_{j_1}^{\max} + (1 - x_{ij_1 l_1 t}) \times M \geq t_{ij_1 l_1}^s - t_{ij_2 l_2}^e - 1, \\ \forall i \in C, j_1, j_2 \in R, \\ l_1 \in (1, 2, ..., N_{ij_1}^{\min}), \\ l_2 \in (1, 2, ..., N_{ij_2}^{\min}), \\ t \in T_{ij_1 l_1}^s, \\ if(T_{ij_1 l_1}^s \cap T_{ij_2 l_2}^e) \neq \emptyset, \\ if(j_1 \neq j_2), \\ if(p_{j_1} < p_{j_2}), \\ y_{ijlt} \geq x_{ijlt}, \\ \forall i \in C, j \in R, l \in (1, 2, ..., N_{ij}^{\min}), \\ t \in T_{ijl}, \\ \sum_{j=1}^{r_{end}} \sum_{l=1}^{N_{ij}^{\min}} y_{ijlt} \leq 1, \quad (6), (9), (10), (11), (12), (13)$$

$$\forall i \in C, t \in T, \quad (۱۴)$$

$$\sum_{i=۱}^{c_{end}} \sum_{l=۱}^{N_{ij}^{\min}} y_{ijlt} \leq a_{jt},$$

$$\forall j \in R, t \in T, \quad (۱۵)$$

$$c_{end} - \sum_{i=۱}^{c_{end}} \sum_{j=۱}^{r_{end}} \sum_{l=۱}^{N_{ij}^{\min}} y_{ijlt} \geq g_t,$$

$$\forall t \in T, \quad (۱۶)$$

$$y_{ijlt} \times t \leq t_{ijl}^{e},$$

$$\forall i \in C, j \in R, l \in (۱, ۲, ..., N_{ij}^{\min}), \quad (۱۷)$$

$$t \in T_{ijl},$$

$$\sum_{t \in T_{ijl}} y_{ijlt} \times t = t_{ijl}^{s} + (t_{ijl}^{s} + ۱) + ... + t_{ijl}^{e},$$

$$\forall i \in C, j \in R, l \in (۱, ۲, ..., N_{ij}^{\min}), \quad (۱۸)$$

$$\sum_{t \in T_{ijl}} y_{ijlt} \leq dur_j,$$

$$\forall i \in C, j \in R, l \in (۱, ۲, ..., N_{ij}^{\min}), \quad (۱۹)$$

$$x_{ijlt}, y_{ijlt} \in \{۰, ۱\},$$

$$t_{ijl}^{s}, t_{ijl}^{e} \in {}^{+}\mathbb{Z} \quad (۲۰)$$

محدودیت ۱، تابع هدف اول، تعداد فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری انجام شده را بیشینه می‌کند.

محدودیت ۲، تابع هدف دوم، نتایج تابع هدف اول را تا حد ممکن در افق زمانی برنامه‌ریزی توزیع می‌کند به‌نحوی که تعداد قطارهایی که روزانه به واحد تعمیرات و نگهداری فرستاده می‌شوند کمینه شود، به بیان دیگر قابلیت دسترسی قطارها را بیشینه می‌کند.

محدودیت ۳، زمان شروع lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$ را تعیین می‌کند.

محدودیت ۴ نشان‌دهنده‌ی زمان پایان lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$ است.

محدودیت ۵ بیان می‌کند که متغیر باینری زمان شروع lامین بار انجام فعالیت نوع $j \in R$ روی قطار $i \in C$، در بازه زمانی $t \in T_{ijl}^{s}$ می‌تواند مقدار ۱ بگیرد در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد.

محدودیت ۶ بیان می‌کند که اگر دو فعالیت متفاوت در بازه زمانی شروع اشتراک داشته باشند، فعالیتی که اولویت بالاتری دارد انجام خواهد شد، زیرا فعالیت‌هایی که اولویت بالاتری دارند فعالیت‌های با اولویت پایین‌تر را پوشش می‌دهند.

محدودیت‌های ۷ تا ۱۰ تضمین می‌کنند که اختلاف زمانی متوالی دو فعالیت یکسان روی یک قطار مشخص باید در دوره زمانی آن فعالیت باشد.

محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند که اگر یک فعالیت با اولویت پایین‌تر بعد از پایان یک فعالیت با اولویت بالاتر شروع شود، باید زمان شروعش به اندازه‌ی دوره فعالیت با اولویت پایین‌تر به تعویق بیفتد زیرا فعالیت‌های اولویت بالاتر فعالیت‌هایی با اولویت پایین‌تر را هم پوشش می‌دهند.

محدودیت ۱۳ بیان می‌کند که اگر در یک زمان معین متغیر باینری x مقدار بگیرد، متغیر باینری y باید در آن زمان مقدار بگیرد.

محدودیت ۱۴ تضمین می‌کند در یک زمان معین روی یک قطار مشخص، فقط یک فعالیت می‌تواند انجام شود. به بیان دیگر، هیچ دو فعالیتی به‌صورت هم‌زمان روی یک قطار انجام نمی‌شود.

محدودیت ۱۵ نشان می‌دهد که به‌ازای هر فعالیت در هر زمان معین تعداد قطار مشخصی به واحد تعمیرات و نگهداری فرستاده می‌شود. به بیان بهتر، نشان‌دهنده‌ی ظرفیت تیم خدمه‌ی تعمیرات و نگهداری در هر زمان معینی است.

محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند همیشه باید در یک زمان معین، تعداد قطار مشخصی در خط باقی بماند.

محدودیت ۱۷ تضمین می‌کند متغیرهای باینری y مرتبط با یک فعالیت مشخص نهایتاً تا زمان پایان آن فعالیت مقدار می‌گیرند.

محدودیت ۱۸ نشان می‌دهد که متغیرهای باینری y مرتبط با یک فعالیت مشخص در زمانی که آن فعالیت انجام می‌شود مقدار می‌گیرند.

محدودیت ۱۹ تضمین می‌کند متغیرهای باینری y مرتبط با یک فعالیت مشخص به تعداد طول زمان انجام آن فعالیت مقدار می‌گیرد.

محدودیت ۲۰ نشان می‌دهد که متغیرهای باینری x و y فقط مقادیر صفر و ۱ را می‌گیرند.

محدودیت ۲۱ نشان می‌دهد که متغیرهای t_{ijl}^{s} و t_{ijl}^{e} فقط مقادیر عدد صحیح مثبت را می‌گیرند.

۴. نتایج محاسباتی مطالعه‌ی موردی (خروجی‌های حل‌کننده‌ی گروبی)

به منظور ارزیابی مدل ریاضی پیشنهادی، یک مطالعه‌ی موردی را در نظر گرفته‌ایم تا بتوانیم از آن برای تأیید اعتبار مدل ریاضی استفاده کنیم. در این مثال دو نوع فعالیت مختلف تعمیرات و نگهداری، هفتگی و ماهانه برای ۱۰ قطار در نظر گرفته شده است. اولویت هر فعالیت با سایر فعالیت‌ها متفاوت است؛ اولویت فعالیت ماهانه بالاتر از فعالیت هفتگی است. اولویت فعالیت تعمیرات و نگهداری یک عامل کلیدی است که در آن، پس از انجام فعالیت با اولویت بالاتر، دیگر نیازی به انجام فعالیت‌های با اولویت پایین‌تر نخواهد بود. هر فعالیت دارای چرخه‌ی زمانی خاص است، چرخه‌ی فعالیت هفتگی ۷ تا ۱۲ روز و چرخه‌ی فعالیت ماهانه ۳۰ تا ۵۰ روز است. همچنین مدت زمان انجام فعالیت‌ها متفاوت است، یعنی مدت زمان انجام فعالیت هفتگی ۴ ساعت است و مدت زمان انجام فعالیت ماهانه ۱ روز است. ظرفیت تیم خدمه‌ی تعمیرات و نگهداری روزانه سه قطار برای انجام فعالیت هفتگی و سه قطار برای انجام فعالیت ماهانه است. افق برنامه‌ریزی به‌صورت فصلی در نظر گرفته شده است (یعنی ۹۰ روز) و حداقل تعداد قطارهای در دسترس در خط شش قطار در نظر گرفته شده است. برای حل مدل ریاضی و آنالیز محاسباتی از حل‌کننده‌ی گروبی، نسخه‌ی ۸,۰,۰ در یک سیستم دارای پنج هسته، پردازنده‌ی ۲٫۶۰ گیگاهرتز، ۶۴ بیتی با ۴ گیگابایت رم و سیستم عامل ویندوز ۱۰ استفاده کرده‌ایم. نتایج عددی بهینه برای مثال مذکور در جدول ۱ نشان داده شده است. مدل اول سعی دارد که از بیشترین ظرفیت فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری انجام شده استفاده کند و مدل دوم به دنبال کاهش تعداد قطارهای ارسال شده به واحد تعمیرات و نگهداری به‌صورت روزانه است. مقدار تابع هدف اول نشان می‌دهد که ۱۰۰ درصد فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری انجام شده است. مقدار تابع هدف دوم

جدول ۱. نتایج مثال ساده.

مدل	مقدار تابع هدف	تعداد کل فعالیت‌ها	تعداد متغیرها	تعداد محدودیت‌ها	زمان حل (ثانیه)
۱	۷۵	۷۵	۸۴۰۱	۵۵۲۰۶	۳۹٫۸۸۰
۲	۲		۸۴۰۱	۵۵۴۴۵	۶۴٫۵۰۴

نشان می‌دهد که حداکثر دو قطار در روز در طول افق برنامه‌ریزی به واحد تعمیرات و نگهداری ارسال می‌شوند.

۵. استفاده از الگوریتم برای حل مسئله در ابعاد بزرگ

مسائل بهینه‌سازی در مهندسی، طبیعتاً پیچیده‌تر و مشکل‌تر از آن هستند که با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی نظیر روش مدل‌سازی ریاضی و نظایر آن قابل حل باشند. بنابراین بهینه‌سازی یک فعالیت مهم و تعیین کننده در طراحی ساختاری است. مهندس‌ها زمانی قادر خواهند بود طرح‌های بهتری تولید کنند که بتوانند با روش‌های بهینه‌سازی در صرف زمان و هزینه‌ی طراحی صرفه‌جویی کنند. یکی از مهم‌ترین دسته مسائل بهینه‌سازی که کاربرد فراوانی دارد، بهینه‌سازی ترکیبی است که هدف آن جست‌وجو برای یافتن نقطه‌ی بهینه‌ی توابع با متغیرهای گسسته است. در سال‌های اخیر توجه بیشتری به روش‌های ابتکاری صورت گرفته است که نتایج بسیار خوبی در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی پیچیده به دنبال داشته است.[۲۱]

۱.۵. الگوریتم ابتکاری عقب‌گرد

«عقب‌گرد» روشی است که بر اساس یک الگوریتم برای حل برخی مسائل ساخته شده است. این روش با استفاده از فراخوانی بازگشتی و ساختن یک راه حل گام به گام به یافتن جواب بهینه کمک می‌کند. الگوریتم عقب‌گرد بر اساس محدودیت‌هایی که برای حل مسئله ارائه می‌شود راه حل‌هایی را که منجر به حل مسئله نمی‌شوند، حذف می‌کند.[۲۲]

الگوریتم ابتکاری عقب‌گرد اولین بار برای حل مسئله‌ی n وزیر توسط ادسخر ویبه دِیکسترا ارائه شد. در این مسئله، هدف چیدن n مهره‌ی وزیر در یک صفحه‌ی شطرنج با ابعاد $n \times n$ است.

وزیر مهره‌یی از مهره‌های بازی شطرنج است که می‌تواند در تمامی هشت جهت به هر تعداد خانه تا زمانی که مهره‌یی مانع نباشد حرکت کند. اگر در این مسیرها مهره‌یی از حریف قرار گرفته باشد، آن مهره در معرض خطر حمله توسط وزیر قرار دارد یا به اصطلاح وزیر آن مهره را تهدید می‌کند. هدف از مسئله‌ی هشت وزیر، چیدن هشت مهره‌ی وزیر روی یک صفحه‌ی شطرنج خالی است، به قسمی که هیچ مهره‌یی مهره‌های دیگر را تهدید نکند. به عبارت دیگر، هشت وزیر باید به نحوی چیده شوند که هیچ کدام در یک سطر، یک ستون یا یک قطر قرار نداشته باشند.[۲۳]

۲.۵. نتایج محاسباتی مطالعه موردی (خروجی‌های الگوریتم عقب‌گرد)

در این مثال دو نوع فعالیت مختلف تعمیرات و نگهداری، هفتگی و ماهانه برای ۱۰ قطار در نظر گرفته شده است. اولویت هر فعالیت با سایر فعالیت‌ها متفاوت است، اولویت فعالیت ماهانه بالاتر از فعالیت هفتگی است. اولویت فعالیت

جدول ۲. مقایسه نتایج حل‌کننده گروبی و الگوریتم عقب‌گرد برای مطالعه موردی.

روش حل	مدل	مقدار تابع هدف	تعداد کل فعالیت‌ها	زمان حل (ثانیه)
حل‌کننده گروبی	۱	۷۵	۷۵	۶۴٫۵۰۴
	۲	۲		
الگوریتم عقب‌گرد	۱	۷۵		۰٫۰۹۳۷۵۸
	۲	۳		

تعمیرات و نگهداری یک عامل کلیدی است که در آن، پس از انجام فعالیت با اولویت بالاتر، دیگر نیازی به انجام فعالیت‌های با اولویت پایین‌تر نخواهد بود. هر فعالیت دارای چرخه‌ی زمانی خاص است، چرخه‌ی فعالیت هفتگی ۷ تا ۱۲ روز و چرخه‌ی فعالیت ماهانه ۳۰ تا ۵۰ روز است. همچنین مدت زمان انجام فعالیت‌ها متفاوت است، یعنی مدت زمان انجام فعالیت هفتگی ۴ ساعت است و مدت زمان انجام فعالیت ماهانه ۱ روز است. ظرفیت تیم خدمه‌ی تعمیرات و نگهداری روزانه سه قطار برای انجام فعالیت هفتگی و سه قطار برای انجام فعالیت ماهانه است. افق برنامه‌ریزی به‌صورت فصلی، یعنی ۹۰ روزه در نظر گرفته شده است و کمترین تعداد قطارهای در دسترس در خط ۶ قطار در نظر گرفته شده است.

برای پیاده‌سازی الگوریتم و آنالیز محاسباتی، از نرم‌افزار پایتون، نسخه‌ی ۳٫۷، در یک سیستم دارای پنج هسته، پردازنده‌ی ۲٫۶۰ گیگاهرتز، ۶۴ بیتی با ۴ گیگابایت حافظه و سیستم عامل ویندوز ۱۰ استفاده کرده‌ایم. طبق نتایج به دست آمده از جدول ۲ در هر دو روش مقدار تابع هدف اول، یعنی تعداد فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری انجام شده برابر است اما مقدار تابع هدف دوم آنها برابر نیست و در رابطه با زمان حل مسئله کاملاً مشخص است که الگوریتم عقب‌گرد به مراتب سرعت بالاتری نسبت به حل‌کننده‌ی گروبی دارد.

۶. مطالعه‌ی موردی

برای متروی شهر تهران یازده خط در نظرگرفته شده، که تاکنون هفت خط آن فعال است و مسافران را جابه‌جا می‌کند. خط ۲ مترو، شمال شرق تهران را با ۲۲ ایستگاه به غرب متصل کرده و تا صادقیه ادامه پیدا می‌کند. خط ۲ با خط شش در ایستگاه امام حسین (ع)، با خط چهار در ایستگاه دروازه شمیران، با خط ۱ در ایستگاه امام خمینی، با خط ۳ (در دست مطالعه) در ایستگاه دانشگاه امام علی، با خط ۷ در ایستگاه شهید نواب صفوی و با خط ۴ در ایستگاه شادمان تقاطع دارد. در ایستگاه میدان صادقیه شما می‌توانید با خط ۵ تا کرج نیز بروید. لذا خط ۲ مترو تهران یکی از خطوط بسیار مهم است چرا که هم با ۵ خط دیگر ایستگاه مشترک دارد و هم تقاضای زیادی برای جابه‌جایی مسافر در آن وجود دارد. در این پژوهش سعی داریم برنامه‌ریزی زمان‌بندی مناسبی برای قطارهای خط ۲ متروی تهران ارائه کنیم تا بتوانیم قابلیت دسترسی قطارها را افزایش بدهیم و در نتیجه یا تعداد قطارهای در دسترس در خط را افزایش بدهیم، یا از تعداد قطارکم‌تری در خط ۲ استفاده کنیم. خط ۲ متروی تهران دارای ۴۲ قطار است. افق زمانی برنامه‌ریزی ۵۰۰ روز در نظرگرفته شده است، با توجه به این افق زمانی سه نوع فعالیت مختلف تعمیرات و نگهداری، هفتگی و ماهانه و سالانه را در نظر می‌گیریم. اولویت هر فعالیت با سایر فعالیت‌ها متفاوت است؛ اولویت فعالیت سالانه بالاتر از فعالیت‌های ماهانه و هفتگی است و اولویت فعالیت ماهانه بالاتر از فعالیت هفتگی است. هر فعالیت دارای چرخه‌ی زمانی متفاوتی است، چرخه‌ی فعالیت

جدول ۳. نتایج برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری خط ۲ مترو تهران.

تعداد قطار	حداقل تعداد قطارهای در دسترس در خط	مدل	مقدار تابع هدف	تعداد کل فعالیت‌ها	زمان حل ثانیه
۴۲	۳۰	۱	۲۹۵	۳۸۴۵	۶۲٫۴۸۴
		۲	۳		

جدول ۴. بررسی اثرات ناشی از کاهش تعداد قطارها (سناریو ۱).

تعداد قطار	حداقل تعداد قطارهای در دسترس در خط	مدل	مقدار تابع هدف	تعداد کل فعالیت‌ها	زمان حل (ثانیه)
۴۲	۳۰	۱	۲۹۵	۳۸۴۵	۶۲٫۴۸۴
		۲	۳		
۴۱		۱	۲۹۵	۳۷۴۷	۷۱٫۹۸۴
		۲	۳		
۴۰		۱	۲۹۵	۳۶۵۳	۶۷٫۷۳۶
		۲	۳		
۳۹		۱	۲۹۵	۳۵۳۱	۸۳٫۷۸۳
		۲	۳		
۳۸		۱	۲۹۵	۳۴۴۱	۹۱٫۵۸۳
		۲	۳		
۳۷		۱	۲۹۵	۳۳۲۲	۶۷٫۴۸۳
		۲	۳		
۳۶		۱	۲۹۵	۳۲۱۰	۷۱٫۸۴۹
		۲	۳		
۳۵		۱	۲۹۵	۳۱۲۰	۸۰٫۱۲۲
		۲	۳		
۳۴		۱	۲۹۳	۳۰۰۲	۸۱٫۳۹۲
		۲	۳		
۳۳		۱	۲۹۰	۲۸۹۳	۶۷٫۱۷۴
		۲	۳		

هفتگی ۷ تا ۱۲ روز، چرخه‌ی فعالیت ماهانه ۳۰ تا ۵۰ روز و چرخه‌ی فعالیت سالانه ۳۶۰ تا ۴۵۰ روز است. همچنین مدت زمان انجام فعالیت‌ها متفاوت است، یعنی مدت زمان انجام فعالیت هفتگی ۴ ساعت، مدت زمان انجام فعالیت ماهانه ۱ روز و مدت زمان انجام فعالیت سالانه ۵ روز است. ظرفیت تیم خدمه‌ی تعمیرات و نگهداری روزانه چهار قطار برای انجام فعالیت هفتگی، دو قطار برای انجام فعالیت ماهانه و یک قطار برای انجام فعالیت سالانه است. حداقل تعداد قطارهای در دسترس در خط، ۳۰ قطار است. برای حل این مسئله با استفاده از حل‌کننده‌ی گروبی، تعداد ۹۶۷۹۸۹ متغیر و ۴۴۳۲۸۵۵۶ محدودیت وجود دارد. در نتیجه استفاده از حل‌کننده‌ها به دلیل طولانی بودن زمان حل مسئله منطقی نیست، لذا برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارهای خط ۲ مترو تهران از الگوریتم ابتکاری عقب‌گرد استفاده می‌کنیم. طبق نتایج جدول ۳ با توجه به مقدار تابع هدف اول، حداکثر ۲۹۵ فعالیت تعمیرات و نگهداری قابل انجام است و با توجه به مقدار تابع هدف دوم، در بدترین حالت روزانه ۳ قطار به واحد تعمیرات و نگهداری ارسال می‌شود.

۱.۶. تحلیل حساسیت و سناریوها

۱.۱.۶. بررسی اثرات ناشی از کاهش تعداد قطارها (سناریو ۱)

طبق نتایج جدول ۴ می‌توان گفت که اگر تعداد قطارهای خط ۲ مترو تهران را ۹ واحد کاهش دهیم؛ یعنی اگر به جای ۴۲ قطار از ۳۳ قطار استفاده کنیم، می‌توانیم در اوج ساعات شلوغی همان ۳۰ قطار مورد نیاز را در خط داشته باشیم. در نتیجه با کاهش ۹ قطار از خط می‌توانیم قابلیت دسترسی قطارها را ۲۱ درصد افزایش بدهیم.

۲.۱.۶. بررسی اثرات ناشی از افزایش کمینه‌ی تعداد قطارهای در دسترس در خط (سناریو ۲)

طبق نتایج جدول ۵، اگر کمینه‌ی تعداد قطارهای در دسترس در خط را ۹ واحد افزایش دهیم، در بدترین حالت روزانه به جای ۴ قطار، ۳ قطار به واحد تعمیرات و نگهداری فرستاده می‌شود. در نتیجه ما می‌توانیم با ۲۱ درصد افزایش در کمترین

جدول ۵. بررسی اثرات ناشی از افزایش درکمینه تعداد قطارهای در دسترس در خط (سناریو ۲).

تعداد قطار	کمینه تعداد قطارهای در دسترس در خط	مدل	مقدار تابع هدف	تعداد کل فعالیت‌ها	زمان حل (ثانیه)
۴۲	۳۰	۱	۲۹۵	۳۸۴۵	۵۴٫۲۶۷
		۲			
		۳			
	۳۱	۱	۲۹۵		۶۵٫۳۸۴
		۲			
		۳			
	۳۲	۱	۲۹۵		۷۱٫۴۰۳
		۲			
		۳			
	۳۳	۱	۲۹۵		۶۵٫۹۸۷
		۲			
		۳			
	۳۴	۱	۲۹۵		۷۳٫۸۹۱
		۲			
		۳			
	۳۵	۱	۲۹۵		۶۷٫۴۸۳
		۲			
		۳			
	۳۶	۱	۲۹۵		۷۰٫۵۷۳
		۲			
		۳			
	۳۷	۱	۲۹۵		۸۱٫۳۴۵
		۲			
		۳			
	۳۸	۱	۲۹۵		۸۱٫۳۹۲
		۲			
		۳			
	۳۹	۱	۲۹۳		۷۳٫۹۰۰
		۲			
		۳			

تعداد قطارهای در دسترس در خط یا به عبارت دیگر با ۲۱ درصد افزایش در قابلیت دسترسی قطارها از همان ۴۲ قطار در خط استفاده کنیم.

۷. نتیجه‌گیری

همان‌طورکه در بخش مرور ادبیات اشاره شد، زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری تاکنون با در نظرگرفتن تابع هدف کاهش هزینه‌ها اکثراً در حوزه‌ی راه‌آهن انجام شده است و بنابراین تمرکز خیلی کم‌تری در حوزه مترو بوده است. در مطالعه‌ی انجام شده سعی شد تا برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری خط ۲ مترو تهران بهینه شود به نحوی که قابلیت دسترسی قطارها بیشینه شود.

طبق نتایج تحلیل حساسیت‌ها مشاهده شد که می‌توان قابلیت دسترسی قطارها را افزایش داد، این افزایش بدان معناست که خط ۲ مترو تهران یا باید از تعداد قطار کم‌تری استفاده کند یا این که حداقل تعداد قطارهای در دسترس در خط را افزایش دهد. خط ۲ مترو تهران از ۴۲ قطار استفاده می‌کند که در ساعات اوج شلوغی نیازمند است تا ۳۰ قطار در خط باشد. طبق نتایج به دست آمده در این پژوهش، مترو می‌تواند خط ۲ را با ۳۳ قطار اداره کند و ۹ قطار دیگر را به خطوط دیگر اختصاص بدهد؛ یا این که با ۴۲ قطار خط را اداره کند به شرطی که حداقل تعداد قطارهای در دسترس را از ۳۰ قطار به ۳۹ قطار افزایش بدهد.

بنابراین با ارائه‌ی یک برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری مناسب می‌توان بهبود ۲۱٫۴۲ درصدی در خط ۲ مترو تهران ارائه کرد؛ به عبارت دیگر قابلیت دسترسی قطارها را می‌توان ۲۱٫۴۲ درصد افزایش داد.

۱.۷. نوآوری و مطالعات آتی

چنان که گفته شد، کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری تاکنون هدف بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌ی راه‌آهن در زمینه‌ی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارها بوده است. در این مطالعات بیشتر از توابع هدف مرتبط با کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری استفاده شده و افزایش قابلیت دسترسی قطارها کم‌تر مورد توجه بوده است. بنابراین، ازجمله نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری در حوزه‌ی مترو، با تابع هدف افزایش قابلیت دسترسی قطارها اشاره کرد.

از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به عدم وجود تحقیقات مشابه داخلی در این حیطه اشاره کرد که در این صورت، محقق نمی‌تواند نتایجی که از کار خود به دست آورده را با سایر تحقیقات مقایسه و ارزیابی کند. محدودیت دیگری که در این خصوص وجود داشته نیز تعداد بسیار کم مطالعات خارجی در این زمینه‌ی خاص (برنامه‌ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری قطارهای مترو با هدف بیشینه‌سازی قابلیت دسترسی قطارها) بوده است.

در حوزه‌ی ارائه‌ی روش حل برای مسائلی از این قبیل که از پیچیدگی بالایی برخوردارند، استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا‌ابتکاری اصلی‌ترین راه حل است. لذا در این حوزه استفاده از الگوریتم‌هایی نظیر ژنتیک، تبرید شبیه‌سازی شده، مورچگان، جست‌وجوی ممنوعه و ازدحام ذرات پیشنهاد می‌شود.

منابع (References)

1. Garg, A. and Deshmukh, S.G. "Maintenance management: literature review and directions", *J. Qual. Maint. Eng*, **12**(3), pp. 205-238 (2006).
2. Ma, L., Zhang, X.-X.X., Guo, J. and et al. "Optimization model and algorithm for rolling stock maintenance scheduling in metro", *Comput. Railw. XV Railw. Eng. Des. Oper*, **162** (Cr), pp. 355-366 (2016).
3. Van Horenbeek, A., Pintelon, L., Muchiri, P. and et al. "Maintenance optimization models and criteria", *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag*, **1**(3), pp. 189-200 (2010).
4. Sriskandarajah, C., Jardine, A.K.S.S. and Chan, C.K. "Maintenance scheduling of rolling stock using a genetic algorithm", *J. Oper. Res. Soc*, **49**(11), pp. 1130-1145 (1998).
5. Sevaux, M. and Le Quéré, Y. and Le Quere, Y. "Solving a robust maintenance scheduling problem at the french railways company", no. November, pp. 1-17 (2003).
6. Hani, Y., Chehade, H., Amodeo, L. and et al. "Simulation based optimization of a train maintenance facility model using genetic algorithms", *In Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on*, **1**, pp. 513-518 (2006).
7. Doganay, K. and Bohlin, M. "Maintenance plan optimization for a train fleet", *WIT Trans. Built Environ*, **114**(12), pp. 349-358 (2010).
8. Park, G., Yun, W.Y., Han, Y.-J.J. a,d et al. "Optimal preventive maintenance intervals of a rolling stock system", *ICQR2MSE 2011 - Proc. 2011 Int. Conf. Qual. Reliab. Risk, Maintenance, Saf. Eng*, no. 2010, pp. 427-430 (2011).
9. Yun, W.Y., Han, Y.J. and Park, G. "Optimal preventive maintenance intervals of a rolling stock", *J. Reliab. Eng. Assoc. Japan*, **35**(7), pp. 403-417 (2013).
10. Zhang, D. and Hu, H. "An optimization on subway vehicle maintenance using a multi-population genetic algorithm", *In Sustainable Development of Critical Infrastructure*, pp. 316-323 (2014).
11. Giacco, G.L., Carillo, D., D'Ariano, A. et al. "Short-term rail rolling stock rostering and maintenance scheduling", *Transp. Res. Procedia*, **3**, pp. 651-659 (2014).
12. Giacco, G.L., Carillo, D., D'Ariano, A. and et al. "Short-term rolling stock rostering and maintenance scheduling optimization", *Ing. Ferrov*, **1**, pp. 39-52 (2014).
13. Lai, Y.C., Fan, D.C. and Huang, K.L. "Optimizing rolling stock assignment and maintenance plan for passenger railway operations", *Comput. Ind. Eng*, **85**, pp. 284-295 (2015).
14. Asekun, O.O., Fourie, C.J. and Fourie, C.J. "Selection of a decision model for rolling stock maintenance scheduling", *South African J. Ind. Eng*, **26**(1), p. 135 (2015).
15. Andrés, J., Cadarso, L. and Marin, Á. "Maintenance scheduling in rolling stock circulations in rapid transit networks", *Transp. Res. Procedia*, **10**(July), pp. 524-533 (2015).
16. Li, J., Lin, B., Wang, Z. and et al. "A pragmatic optimization method for motor train set assignment and maintenance scheduling problem", *Discret Dynamics in Nature and Society, Hindawi*, **2016**, pp.1-13 (2016).
17. Ma, L., Zhang, X.-X., Guo, J. and et al. "Optimization model and algorithm for rolling stock maintenance scheduling in metro", *162*(Cr), pp. 355-366 (2016).
18. Herr, N., Nicod, J.-M., Varnier, C. and et al. "Joint optimization of train assignment and predictive maintenance scheduling", *7th Int. Conf. Railw. Oper. Model. Anal. (RailLille 2017)*, (April), pp. 699-708 (2017).
19. Lin, B. and Lin, R. "An approach to the high-level maintenance planning for EMU trains based on simulated annealing", arXiv Prepr. arXiv1704.02752 (2017).
20. Wu, J., Lin, B., Wang, H. and et al. "Optimizing the high-level maintenance planning problem of the electric multiple unit train using a modified particle swarm optimization algorithm", *Symmetry* , **10**(8), pp.349 (2018).DOI:10.3390/sym10080349.
21. Yaghini, M., Mirghavvami. M. and Shamaeizade. M. "A Heuristic approach for scheduling of railway track maintenance machines", https://civilica.com/doc/1021613, (2019).
22. Moayedfar, R. and Mahjoob, A. "Planning maintenance and repair of railroads based on the prioritization algorithm", http://www.trijournal.ir/article_68483.html (2019).
23. Jalilian, M. and Yaghini, M. "Train timetabling considering track maintenance scheduling (Literature Review)", https://www.magiran.com/paper/2237911?lang=en (2021).
24. Shafahi, Y. and Fendereski, A. "Simultaneous scheduling of trains and maintenance of railways", https://civilica.com/doc/979/ (2004).